

PROJETO DE AVALIAÇÃO - P2

COE710 - Projeto Físico e Fabricação de Circuitos Integrados

Prof.: Carlos Fernando Teodósio Soares

2018/3

Resumo

Este documento tem como finalidade apresentar as especificações do projeto de um filtro Gm-C totalmente integrado, cujo objetivo é verificar as competências em projeto físico de circuitos integrados dos alunos inscritos na disciplina COE710 - Projeto Físico e Fabricação de Circuitos Integrados. Na Seção I são apresentadas as especificações e o projeto do filtro Gm-C passa-baixas. Na Seção II, é apresentado o circuito do transcondutor que será adotado no projeto do filtro. Na Seção III é apresentado um roteiro para o projeto do circuito transcondutor. Finalmente, na Seção IV, serão listadas as atividades que serão avaliadas neste projeto ao final da disciplina.

I. FILTRO GM-C PASSA-BAIXAS

O filtro a ser projetado neste trabalho é do tipo passa-baixas e deve apresentar uma frequência de corte em 1,0 MHz. A função de transferência do filtro foi obtida através da Aproximação de Chebyshev de 3ª ordem, cujo gráfico do módulo da resposta em frequência é apresentado na Fig. 1. Conforme pode ser observado nesses gráficos, a resposta em frequência do filtro apresenta um ganho máximo na banda passante de 0 dB — o que equivale a 1,0 V/V em valores absolutos — e uma atenuação máxima nessa mesma banda e 1,0 dB em relação ao ganho em DC.

Na Fig. 2(a) é apresentado o protótipo passivo, na forma de rede *ladder*, capaz de realizar a função de transferência passa-baixas desejada. Esse circuito *ladder* não é adequado para uma implementação totalmente integrada em virtude do tamanho proibitivo que determinados componentes passivos (resistores e indutores) podem ocupar no chip.

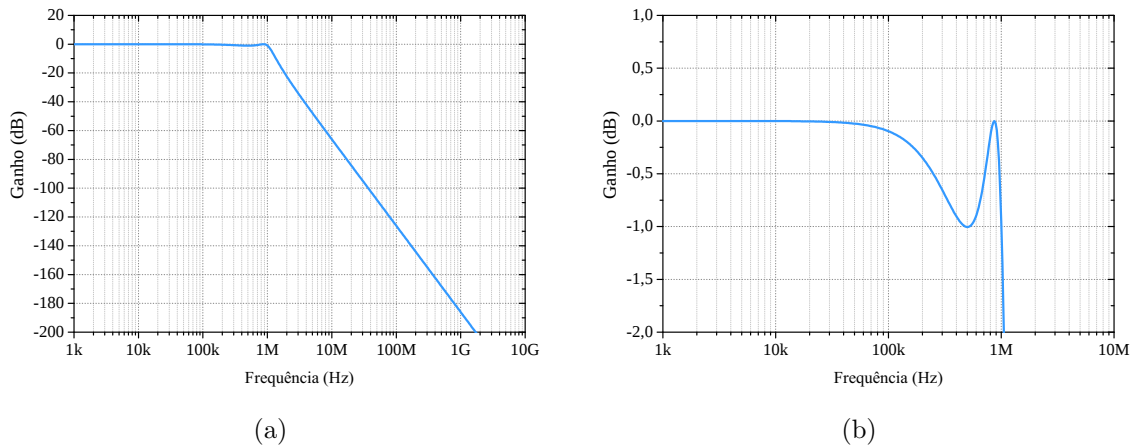


FIGURA 1: Módulo da Resposta em Frequência ideal (a) do Filtro Gm-C da Fig. 2, juntamente com o detalhe da sua banda passante (b).

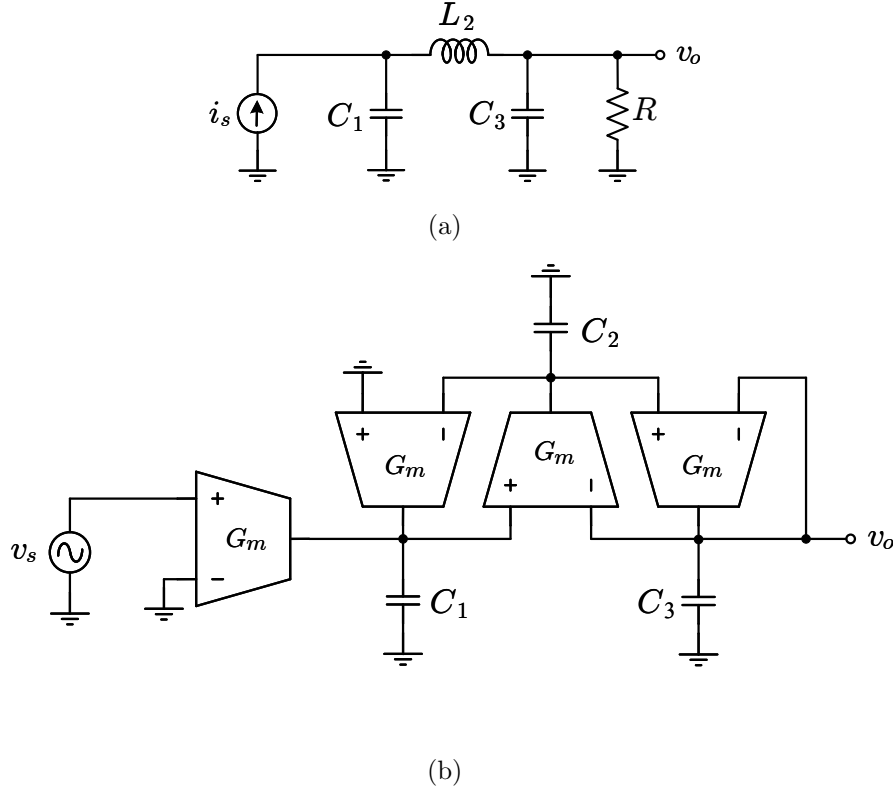


FIGURA 2: Protótipo passivo do filtro passa-baixas de terceira ordem no formato de rede *ladder* (a) e a sua implementação usando a técnica Gm-C (b).

Por essa razão, esse protótipo *ladder* será implementado através do circuito equivalente exibido na Fig. 2(b). Nessa versão equivalente, os capacitores C_1 e C_3 foram os únicos componentes preservados em relação ao protótipo original. Os resistores foram substituídos por transcondutores realimentados e o indutor L_2 foi realizado através da combinação de um capacitor C_2 com um circuito girador, implementado através da combinação de três transcondutores. Como o circuito equivalente é constituído exclusivamente por transcondutores e capacitores, essa técnica de realização de filtros é conhecida como Gm-C.

No circuito da Fig. 2(b), todos os transcondutores são iguais e são implementados através de Amplificadores Operacionais de Transcondutância (OTA - *Operational Transconductance Amplifiers*), cujo diagrama esquemático será apresentado na Seção II. É importante mencionar aqui que a área ocupada em silício pelos transcondutores é consideravelmente menor que aquela que seria tomada pelos resistores e pelo indutor, tornando o circuito da Fig. 2(b) mais conveniente para a implementação integrada.

Para que o filtro da Fig. 2(b) apresente a resposta em frequência mostrada nos gráficos da Fig. 1, os componentes do circuito foram dimensionados com os valores listados na Tabela 1. Tais valores foram devidamente escolhidos de modo a permitir a implementação

TABELA 1: Valores Projetados para os componentes do Filtro Gm-C.

COMPONENTES	VALORES
G_m	$6,2 \mu\text{A/V}$
C_1	$1,5 \text{ pF}$
C_2	$1,3 \text{ pF}$
C_3	$1,0 \text{ pF}$

II. AMPLIFICADOR OPERACIONAL DE TRANSCONDUTÂNCIA

FIGURA 3: Circuito esquemático do OTA (a) adotado no projeto do Filtro Gm-C da Fig. 2, juntamente com o seu esquema de polarização (b).

Os transistores M_3 e M_4 do circuito da Fig. 3(a) implementam as duas fontes de corrente empregadas na polarização do par diferencial. Os demais transistores implementam a saída do OTA em cascode dobrado [1], cujo objetivo é o de prover uma elevada impedância de saída ao amplificador.

Finalmente, na Fig. 3(b), temos os circuitos de polarização dos espelhos de corrente empregados no estabelecimento das tensões $V_{b1} - V_{b4}$ do OTA. Nesse circuito, considere que a fonte de corrente de polarização I_{bias} é fornecida externamente ao chip.

No projeto do filtro Gm-C da Fig. 2(b) são necessários cinco OTAs idênticos, onde o esquema de polarização da Fig. 3(b) é o mesmo para todos. Dessa forma, na construção física do filtro, não há necessidade de ser construir um circuito de polarização dedicado para cada OTA. Basta implementar apenas um único circuito da Fig. 3(b) para gerar as tensões de polarização $V_{b1} - V_{b4}$ para todos os cinco OTAs do filtro. Essa abordagem é bem mais econômica no que diz respeito à área ocupada pelo filtro Gm-C no chip.

No circuito do OTA da Fig. 3(a), uma tensão diferencial v_d aplicada à entrada do par M_1 e M_2 produzirá como resposta uma corrente na saída i_{out} que é proporcional a v_d da seguinte forma:

$$i_{out} = G_m \cdot v_d, \quad (1)$$

onde G_m é a transcondutância (ou condutância mútua) do OTA, a qual é dada por:

$$G_m = \frac{2}{R_S + \frac{2}{g_m}}. \quad (2)$$

Em (2), g_m é a transcondutância de pequenos sinais dos transistores M_1 e M_2 do par diferencial e R_S é a resistência equivalente do transistor de degeneração de fonte M_S . Considerando que os transistores do par diferencial são idênticos e que estarão polarizados no modo de saturação, então, suas transcondutâncias de pequenos sinais serão dadas por:

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}(V_{GS}) = \sqrt{2k_P \frac{W}{L} I_D}, \quad (3)$$

onde W e L são, respectivamente, a largura e o comprimento de canal dos transistores M_1 e M_2 , e I_D é a corrente de polarização de ambos. Ainda em (2), a resistência equivalente do transistor M_S em triodo é dada por:

$$R_S = \frac{v_{DS}}{i_D} = \frac{L_S}{k_P W_S (V_{GS} - V_{th})}. \quad (4)$$

Nessa equação, a tensão V_{GS} do transistor M_S é ajustada através de V_{ctrl} , conforme ilustrado na Fig. 3(a).

Com o objetivo de tornar o ajuste da transcondutância do OTA mais eficiente, deve-se dimensionar os transistores do par diferencial M_1 e M_2 de maneira que $g_m \gg 1/R_S$. Dessa forma, (2) poderá ser aproximada por

$$G_m = \frac{2}{R_S + \frac{2}{g_m}} \approx \frac{2}{R_S}, \quad (5)$$

onde a transcondutância do OTA dependerá quase que exclusivamente de R_S que, por sua vez, tem o seu valor ajustado pela tensão de controle V_{ctrl} .

III. PROJETO DO OTA

Como o objetivo desta disciplina é o de qualificar o profissional para a elaboração de Layouts de circuitos integrados CMOS, o projeto elétrico do OTA será bem simples, e seguirá os passos descritos abaixo. Nesse projeto, será considerado que o filtro Gm-C será construído em um processo de fabricação CMOS de 0,35 μm , com tensões de alimentação simétricas $V_{DD} = 1,5$ V e $V_{SS} = -1,5$ V. Os parâmetros desse processo de fabricação estão listados na Tabela 2.

TABELA 2: Parâmetros dos transistores do processo de fabricação CMOS 0,35 μm .

PARÂMETROS	VALORES
k_N	170 $\mu\text{A/V}$
V_{thn}	0,5 V
k_P	58 $\mu\text{A/V}$
V_{thp}	- 0,65 V

III.1. DEFININDO A CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DC DO OTA

A corrente de polarização do OTA é definida pela máxima corrente i_{out} que o transcondutor deve entregar na saída durante a operação do filtro Gm-C. Esse pior caso da corrente na saída é atingido quando a tensão diferencial v_d na entrada é grande o suficiente para cortar um dos transistores do par diferencial. A partir desse ponto, não há como aumentar a corrente que o par diferencial entrega na saída, mesmo se a tensão v_d for aumentada ainda mais.

Nessa situação extrema em que um dos transistores do par diferencial está cortado, a corrente entregue na saída do OTA será exatamente igual ao dobro da corrente de polarização de cada transistor do par diferencial, ou seja, o dobro da corrente de polarização I_{bias} entregue pelas fontes de corrente formadas pelos transistores M_3 e M_4 (convidamos o leitor a verificar essa afirmação no circuito da Fig. 3(a)).

Além disso, a maior tensão diferencial que pode ser aplicada ao par diferencial do OTA será $v_d = V_{DD} - V_{SS} = 3,0$ V. É claro que um dos transistores do par diferencial irá cortar antes de v_d atingir esse valor extremo, mas vamos considerar neste projeto esse valor como sendo a máxima tensão diferencial de entrada para dar uma razoável margem de folga para a polarização do OTA. Dessa forma, considerando que a corrente máxima na saída do OTA $2 I_{bias}$ é atingida na situação de máxima tensão diferencial na entrada, a expressão (1) resulta em:

$$2 I_{bias} = G_m \cdot v_{dmax} \quad \therefore \quad I_{bias} = \frac{G_m \cdot v_{dmax}}{2}. \quad (6)$$

De acordo com a Tabela 1, a transcondutância G_m especificada para o OTA deve ser de 6,2 $\mu\text{A/V}$. Assim, a partir de (6), concluímos que a corrente de polarização do OTA deverá ser $I_{bias} = 9,3 \mu\text{A}$.

No circuito do OTA da Fig. 3(a), os transistores $M_1 - M_{10}$ devem estar polarizados com a mesma corrente de polarização I_{bias} . Já os transistores M_{11} e M_{12} devem ser polarizados com $2 I_{bias}$. No circuito de polarização da Fig. 3(b), todos os transistores $M_{13} - M_{32}$ devem estar polarizados com a mesma corrente I_{bias} ¹.

III.2. PROJETO DO PAR DIFERENCIAL DO OTA

O par diferencial de entrada é o bloco do OTA responsável por definir a sua transcondutância G_m . O transistor de degeneração M_S deve ser dimensionado de modo a fazer com que o OTA apresente a transcondutância desejada $G_m = 6,2 \mu\text{A/V}$. Considerando a expressão aproximada (5), conclui-se que a resistência equivalente R_S que o transistor M_S deverá exibir será:

$$G_m = \frac{2}{R_S} \quad \therefore \quad R_S = \frac{2}{G_m} = 322,6 \text{ k}\Omega. \quad (7)$$

¹Nesse ponto, o projetista pode optar por polarizar todos os transistores do circuito da Fig. 3(b) com uma corrente menor que I_{bias} para reduzir o consumo de potência do projeto. Caso o projetista opte por essa redução, deve-se escolher uma corrente $I'_{bias} = I_{bias}/N$, onde N é um número inteiro. Essa estratégia visa facilitar o dimensionamento dos transistores dos espelhos de corrente usados na polarização do OTA.

Para que a aproximação (5) tenha validade, o projetista deverá dimensionar os transistores M_1 e M_2 do par diferencial de modo que:

$$g_m = \sqrt{2k_P \frac{W}{L} I_{bias}} \gg \frac{1}{R_S}. \quad (8)$$

Nesse projeto, o projetista deve escolher um comprimento de canal $L \geq 1,0 \mu\text{m}$ de modo a evitar problemas com efeitos de canal curto, que fazem com que a expressão acima para g_m não seja válida. Uma vez definido o comprimento L , pode-se usar (8) para se obter a largura W dos transistores M_1 e M_2 .

Finalmente, o projetista deverá dimensionar a largura W_S e o comprimento L_S do transistor M_S de modo que:

$$R_S = \frac{L_S}{k_P W_S (V_{GS} - V_{th})} = 322,6 \text{ k}\Omega. \quad (9)$$

Nessa expressão, a tensão de polarização V_{GS} em (9) deve ser obtida escolhendo-se um valor de V_{ctrl} na Fig. 3(a) no meio da faixa de valores possíveis que essa tensão de controle pode assumir sem que M_S entre em corte. Dessa maneira, garante-se que a tensão V_{ctrl} será capaz de compensar variações de parâmetros do processo de fabricação que podem tanto aumentar como diminuir a transcondutância do OTA fabricado.

III.3. PROJETO DAS FONTES DE CORRENTE DO OTA

Os transistores $M_3 - M_{12}$ exercem a função de fontes de corrente no circuito do OTA apresentado na Fig. 3(a). No caso específico dos transistores $M_5 - M_{12}$, que constituem os espelhos cascode na saída do OTA, esses MOSFETs devem ser dimensionados de modo a operarem no modo de saturação para uma ampla excursão de sinal na saída do transcondutor. Além disso, o projeto deve garantir que esses espelhos cascode apresentem uma elevada impedância de saída.

Para operarem no modo de saturação, a seguinte condição deve ser respeitada, tanto por MOSFETs de canal N, como por MOSFETs de canal P:

$$|V_{DS}| \geq |V_{GS} - V_{th}|. \quad (10)$$

Definindo $\Delta V_{GS} = V_{GS} - V_{th}$ como sendo a tensão de *overdrive*, conclui-se que $|\Delta V_{GS}|$ deve ser minimizada em todos os transistores dos espelhos cascode para maximizar a excursão de sinal da tensão na saída do OTA. De acordo com [2], a menor tensão de *overdrive* que ainda garante a operação de um MOSFET no regime de inversão forte do canal é $|\Delta V_{GS}| = 200 \text{ mV}$. Portanto, essa será a tensão de *overdrive* adotada na polarização dos transistores $M_3 - M_{12}$.

Outra questão crítica no projeto de espelhos de corrente é o casamento (*matching*) entre os transistores, que garante baixos erros de espelhamento e, consequentemente, minimiza problemas como *offset* e ruído de modo comum. Para se conseguir um bom casamento entre MOSFETs, a principal técnica de projeto requer que todos os transistores dos espelhos de corrente sejam construídos com o mesmo comprimento de canal — pois transistores com comprimento de canal diferentes tendem a apresentar comportamentos físicos diferentes. Dessa forma, o projetista deve escolher um comprimento de canal único a ser adotado em todos os transistores dos espelhos de corrente. Recomenda-se escolher $L \geq 1,0 \mu\text{m}$ para evitar problemas causados por efeitos de canal curto. Além disso, quanto maior o comprimento do canal escolhido, maior será a impedância de saída exibida pelos espelhos cascode. Entretanto, deve-se escolher o comprimento de canal com cautela para não ocupar muita área de silício.

Uma vez definida a tensão de *overdrive* $|\Delta V_{GS}|$ e o comprimento do canal L dos transistores das fontes de corrente, pode-se, então, dimensionar as larguras dos transistores seguindo os seguintes procedimentos:

1. Os transistores M_3 , M_4 , M_5 e M_6 devem ser polarizados com uma corrente $I_{bias} = 9,3 \mu A$ e uma tensão $|V_{GS}| = |\Delta V_{GS}| + |V_{thp}|$. Além disso, a tensão $|V_{DS}|$ nesses transistores deve ser minimizada de modo a maximizar a excursão de sinal na saída do OTA. Por outro lado, para que esses transistores operem no modo de saturação, devemos garantir que $|V_{DS}| \geq |\Delta V_{GS}|$. Dessa forma, com o objetivo de garantir a operação no modo de saturação com uma folga mínima, será adotado:

$$|V_{DS}| = |\Delta V_{GS}| + 100 \text{ mV}. \quad (11)$$

Assim, o projetista deverá encontrar qual a largura W com que os transistores M_3 , M_4 , M_5 e M_6 devem ser dimensionados para que exibam uma corrente de polarização $I_{bias} = 9,3 \mu A$ quando submetidos a $|V_{GS}| = |\Delta V_{GS}| + |V_{thp}|$ e $|V_{DS}| = |\Delta V_{GS}| + 100 \text{ mV}$.

2. Como os transistores M_7 e M_8 fazem parte dos mesmos espelhos de corrente cascode que M_5 e M_6 , então, todos esses transistores devem ser dimensionados com a mesma largura W obtida no passo anterior.
3. Os transistores M_{11} e M_{12} devem ser polarizados com uma corrente $2 I_{bias} = 18,6 \mu A$ e uma tensão $V_{GS} = \Delta V_{GS} + V_{thn}$. Pelas mesmas razões mencionadas no passo 1, também adotaremos para esses dois transistores uma tensão de polarização V_{DS} dada por (11). Portanto, nesta etapa, o projetista deverá encontrar qual a largura W com que os transistores M_{11} e M_{12} devem ser dimensionados para que exibam uma corrente de polarização $2 I_{bias} = 18,6 \mu A$ quando submetidos a $V_{GS} = \Delta V_{GS} + V_{thn}$ e $V_{DS} = \Delta V_{GS} + 100 \text{ mV}$.
4. Os transistores M_9 e M_{10} fazem parte dos mesmos espelhos cascode que M_{11} e M_{12} . Entretanto, a corrente de polarização que circula por M_9 e M_{10} é $I_{bias} = 9,3 \mu A$, ou seja, metade daquela que circula por M_{11} e M_{12} . Dessa forma, M_9 e M_{10} devem ser dimensionados com metade da largura W obtida para M_{11} e M_{12} na etapa 3.

III.4. PROJETO DO ESQUEMA DE POLARIZAÇÃO

No esquema de polarização apresentado na Fig. 3(b), tem-se os circuitos que produzem as tensões $V_{b1} - V_{b4}$, as quais estabelecem as correntes de polarização no OTA. O transistor M_{24} é o responsável por espelhar a corrente de polarização para as fontes de corrente formadas por M_3 e M_4 . Como as correntes de polarização são as mesmas em todos esses transistores, deve-se dimensionar M_{24} com a mesma largura W e comprimento L adotados nos transistores M_3 e M_4 , de modo a garantir um bom casamento entre esses transistores. Caso o projetista tenha adotado uma corrente $I'_{bias} = I_{bias}/N$ no transistor M_{24} a fim de reduzir o consumo de potência, então, esse transistor deverá ser dimensionado com uma largura de canal N vezes menor que aquela adotada em M_3 e M_4 . O comprimento de canal L deve ser o mesmo em todos os transistores dos espelhos para garantir um bom casamento entre os dispositivos.

Da mesma forma, os transistores M_{21} e M_{22} são os responsáveis por espelhar a corrente de polarização para as fontes de corrente formadas por $M_9 - M_{12}$. Como a corrente de polarização em M_{21} e M_{22} é metade daquela adotada em M_{11} e M_{12} , os transistores M_{21} e M_{22} deverão ser dimensionados com o mesmo comprimento de canal L que M_{11} e M_{12} , mas com a metade das suas larguras W . Ou seja, os transistores M_{21} e M_{22} deverão ser construídos com as mesmas dimensões que M_9 e M_{10} . Caso o projetista tenha adotado uma corrente $I'_{bias} = I_{bias}/N$ nos transistores M_{21} e M_{22} , então, esses transistores deverão

ser dimensionados com uma largura de canal $2N$ vezes menor que aquela adotada em M_{11} e M_{12} .

As tensões de polarização V_{b1} e V_{b4} são estabelecidas pelos transistores M_{24} e M_{22} , respectivamente. Entretanto, as tensões de polarização V_{b2} e V_{b3} são estabelecidas pelos transistores M_{25} e M_{23} . Para garantir um bom casamento entre esses transistores, todos devem ser dimensionados com o mesmo comprimento de canal L adotado nas fontes de corrente do OTA. Já as larguras W de M_{25} e M_{23} devem ser dimensionadas através dos seguintes procedimentos:

1. Para produzir a tensão de polarização V_{b2} adequada para este projeto, o transistor M_{25} deverá apresentar a seguinte tensão V_{GS} :

$$|V_{GS}|_{M_{25}} = |V_{GS}|_{M_7} + |V_{DS}|_{M_5}. \quad (12)$$

Mantendo coerência com o projeto das fontes de corrente do OTA, teremos que $|V_{GS}|_{M_7} = |\Delta V_{GS}| + |V_{thp}|$ e $|V_{DS}|_{M_5} = |\Delta V_{GS}| + 100 \text{ mV}$. Portanto, M_{25} deve ser dimensionado com uma largura de canal W tal que esse transistor conduza uma corrente de polarização $I_{bias} = 9,3 \mu\text{A}$ — ou $I'_{bias} = I_{bias}/N$ se for o caso — ao ser submetido às tensões $|V_{GS}|_{M_{25}} = |V_{DS}|_{M_{25}}$ dadas por (12).

2. Analogamente, a tensão de polarização V_{b3} é produzida pelo transistor M_{23} , em virtude da seguinte tensão V_{GS} :

$$|V_{GS}|_{M_{23}} = |V_{GS}|_{M_9} + |V_{DS}|_{M_{11}}. \quad (13)$$

Também com o objetivo de manter coerência com o projeto das fontes de corrente do OTA, teremos que $|V_{GS}|_{M_9} = \Delta V_{GS} + V_{thn}$ e $|V_{DS}|_{M_{11}} = \Delta V_{GS} + 100 \text{ mV}$. Portanto, M_{23} deve ser dimensionado com uma largura de canal W tal que esse transistor conduza uma corrente de polarização $I_{bias} = 9,3 \mu\text{A}$ — ou $I'_{bias} = I_{bias}/N$ se for o caso — ao ser submetido às tensões $|V_{GS}|_{M_{23}} = |V_{DS}|_{M_{23}}$ dadas por (13).

Por fim, resta ainda projetar os transistores dos espelhos de corrente cascode formados pelos transistores $M_{13} - M_{20}$ e $M_{26} - M_{31}$. Para manter a uniformidade do projeto, podemos adotar nesses transistores o mesmo comprimento de canal L e a mesma tensão de *overdrive* $\Delta V_{GS} = 200 \text{ mV}$ adotados no dimensionamento das fontes de corrente do OTA. Os procedimentos para o dimensionamento das larguras de canal de ambos os espelhos de corrente estão descritos a seguir.

1. Os transistores M_{13} e M_{14} devem ser dimensionados com uma largura de canal W de modo que conduzam uma corrente de polarização $I_{bias} = 9,3 \mu\text{A}$ — ou $I'_{bias} = I_{bias}/N$ se for o caso — ao serem submetidos às seguintes tensões:

$$V_{DS} = V_{GS} = \Delta V_{GS} + V_{thn}. \quad (14)$$

Como a corrente de referência em M_{13} e M_{14} deve ser espelhada para as fontes de corrente formadas por $M_{15} - M_{20}$, esses transistores também devem ser construídos com as mesmas dimensões que M_{13} e M_{14} .

2. Analogamente, os transistores M_{26} e M_{27} devem ser dimensionados com uma largura de canal W de modo que conduzam uma corrente de polarização $I_{bias} = 9,3 \mu\text{A}$ — ou $I'_{bias} = I_{bias}/N$ se for o caso — ao serem submetidos às seguintes tensões:

$$|V_{DS}| = |V_{GS}| = |\Delta V_{GS}| + |V_{thp}|. \quad (15)$$

Como a corrente de referência em M_{26} e M_{27} deve ser espelhada para as fontes de corrente formadas por $M_{28} - M_{31}$, esses transistores também devem ser construídos com as mesmas dimensões que M_{26} e M_{27} .

IV. OBJETIVOS DO TRABALHO

Uma vez concluído o dimensionamento do filtro Gm-C, o aluno deverá fazer o projeto do Layout deste filtro, considerando o mesmo processo de fabricação CMOS de $0,35\ \mu\text{m}$. O Layout deverá corresponder exatamente ao diagrama esquemático do projeto elétrico — a ser verificado com o uso da ferramenta de LVS (*Layout Versus Schematic*) — e também deverá ser entregue sem erros de DRC (*Design Rules Checking*).

Além do Layout do filtro Gm-C, o aluno deverá apresentar os seguintes resultados de simulação pós-layout — usando o simulador Spectre e incluindo os efeitos dos elementos parasitas — que atestam o correto funcionamento do circuito projetado:

1. Ponto de polarização DC do circuito do Amplificador Operacional de Transcondutância (OTA).
2. Para o OTA projetado, deve-se obter as curvas de $G_m \times v_d$ para diferentes valores da tensão de controle V_{ctrl} , onde a transcondutância é dada por $G_m = \frac{di_{out}}{dv_d}$. Esse gráfico deve ser obtido fazendo-se uma varredura DC da tensão diferencial na entrada do OTA, com v_d variando de $-3,0$ a $3,0$ V.
3. Resposta em Frequência do OTA em malha aberta para se obter o módulo do ganho de tensão diferencial v_{out}/v_d . Esse gráfico deve ser obtido apenas para a tensão de controle V_{ctrl} que produz a transcondutância G_m desejada para o OTA.
4. Resposta em Frequência do Filtro Gm-C com transcondutores ideais. Essa simulação tem como objetivo verificar o correto dimensionamento do filtro.
5. Resposta em Frequência do Filtro Gm-C com os OTAs projetados neste trabalho. Obter também diferentes gráficos de resposta em frequência para diferentes valores da tensão de controle V_{ctrl} .
6. Curva de THD (Distorção Harmônica Total) da tensão na saída do filtro, obtida para amplitudes do sinal de tensão diferencial na entrada variando entre $10\ \text{mV}$ e $2,0\ \text{V}$.

Todos os resultados deverão ser apresentados em um relatório escrito na forma de artigo científico (folha tamanho A4, duas colunas, fonte *Times New Roman* de 10 pontos) e limitado a um tamanho de 10 (dez) páginas, contendo Resumo, Introdução, Projeto, Resultados das Simulações e Conclusões.

REFERÊNCIAS

- [1] RAZAVI, B., *Design of analog CMOS integrated circuits*. McGraw-Hill, 2001.
- [2] TSIVIDIS, Y., *Operation and Modeling of the MOS Transistor*. 2nd ed. Oxford University Press, 2006.